

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}.$$

У даному випадку експеримент має ту відмінність, що маса M_1 екранована від маси M_2 іншою масою M_3 . Однак, для виключення додаткового притягування між масами M_1 і M_3 , з протилежного боку від M_1 встановлена маса M_4 , яка за розмірами і формою є цілком такою ж, як і маса M_3 (у вигляді плити). В даному випадку взаємодія між масами M_1 і M_2 відбуватиметься крізь масу M_3 , яка повинна поглинати частину гравітонів і таким чином зменшувати взаємодію між ними. Отже, якщо спочатку кулю M_1 встановити посередині між плитами M_3 і M_4 , а потім плити M_3 і M_4 разом відсунути, то куля M_1 повинна зміститися зі свого попереднього положення.

Зауважимо, що подібний дослід був поставлений 200 років тому Кавендішем і його повторення цілком реальне у наш час. Більше того, маючи в своєму розпорядженні лазери, можна значно підвищити чутливість і точність вимірювань.

Експеримент 2. Ідея цього експерименту полягає у виявленні гравітаційної взаємодії між дослідним тілом масою m і масою Місяця M . Оцінка показує, що тіло масою 1 кг на Землі притягується Місяцем з силою приблизно $\approx 0,3$ Н. Отже, йдеться про те, щоб виявити зміну в силі, еквівалентну притягуванню до Землі маси 30 мг. Це можна зробити за допомогою чутливого пружинного динамометра. Для виявлення зміщення тіла на 0,1 мм потрібна пружина довжиною ≈ 30 м.

Ідея експерименту полягає в тому, щоб зафіксувати положення тіла m між Землею (З) і Місяцем (М) (рис. 3 а), а також його зміну, коли Земля повертається разом з тілом m на пружині і воно вже екранується від Місяця самою Землею (З) (рис. 3 б).

У першому випадку (рис. 3 а) пружина повинна бути розтягнута менше, оскільки Місяць (М) і Земля (З) діють на тіло протилежно. Коли ж Земля повертається і закриває собою тіло m (рис. 3 б), тоді, згідно з законом всесвітнього тяжіння (1), розтяг пружини повинен би збільшитися, оскільки і Місяць (М), і Земля (З) притягують тіло m в одну сторону. Однак таке можливе тоді, коли маса Землі не екранує тіло m від Місяця. Тобто, якщо Земля своєю масою не поглинає гравітони, що йдуть від Місяця. Якщо ж екранування є, то розтяг пружини в цьому випадку повинен бути меншим.

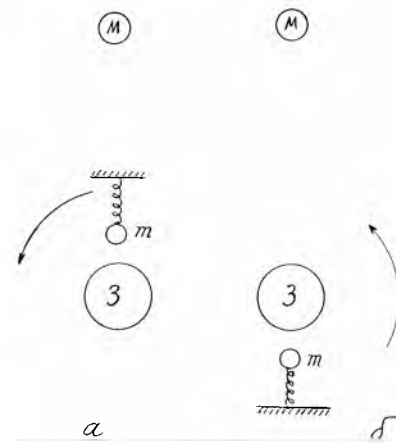


Рис. 3

Зауважимо, що цей експеримент цілком реально поставити. Правда, його постановка була б ефективнішою не на наших широтах, а на екваторі, коли Місяць знаходиться в зеніті.

Висновки. Виявлення гравітонів як частинок, що є носіями гравітаційної взаємодії, має важливе значення для розуміння природи і механізмів сил взаємодії між частинками матерії. Це також має велике значення для розвитку теорії слабкої взаємодії. Запропоновані у статті експерименти дають реальні можливості для виявлення гравітонів.

Список використаних джерел:

1. Хокінг Стивен. Краткая история времени. – СПб.: Амфора, 2004. – С.102.

The mechanism of attracting between two the masses as a result of exchange by graviton which are the particles of gravitation co-operation is examined in work. The method of experimental exposure of graviton's is described as a result of their screening by the third mass on the basis of the Cavendish experience after determination of gravitation permanent, and also by determination of attracting of body by Moon and his screening by Earth.

Key words: gravitation co-operation, exchange by mass, screening by mass, the Cavendish experience, experiment.

Отримано: 25.04.2005.

УДК 681.3.57+37.01:007

І.О.Теплицький, С.О.Семеріков

Криворізький державний педагогічний університет

ЗАДАЧА ПРО ПОЛІТ ПАПЕРОВОГО ЛІТАЧКА

Стаття присвячена досвіду впровадження технології комп'ютерного моделювання у факультативному курсі "Основи комп'ютерного моделювання з фізики" для учнів 9-11 класів технічного та фізико-математичного профілю.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, електронні таблиці.

Ознайомлення старшокласників з технологією комп'ютерного моделювання при вивченні фізики сьогодні залишається актуальною задачею шкільної і вищої педагогічної освіти [1; 2; 3]. У [4] докладно висвітлені погляди авторів на зміст, роль і місце комп'ютерного моделювання в умовах освітнього закладу. Пропонований матеріал присвячений розгляду задачі механіки про рух тіла під дією декількох сил у двовимірній системі координат, де в якості рухомого тіла виступає паперовий літак.

Задача про політ паперового літачка є окремим випадком більш загальної задачі про некерований політ безмоторного літального апарату. Ця задача вперше була сформульована і розв'язана видатним російським вченим, засновником аеродинаміки М.Є.Жуковським (1847-1921). Тут ми розглянемо лише той її варіант, який сам Жуковський назвав "задачею про планер".

Постановка задачі, створення концептуальної моделі

Нехай у повітряному середовищі рухається симетричний планер, тобто планер з розподілом мас, симетричним відносно вертикальної площини, що проходить через його центр мас.

Метою дослідження будемо вважати розв'язання головної задачі механіки: як із плином часу змінюються координати тіла і вектор його миттєвої швидкості (за модулем та напрямом)?

При цьому результатами дослідження мають бути значення всіх кінематичних характеристик рухомого тіла у довільні моменти часу: координат x , y ; проекцій швидкості v_x , v_y ; модуля швидкості v та кута α його нахилу до горизонту; проекцій прискорення a_x , a_y .

Математична модель

Нагадаємо, що метод моделювання передбачає прийняття певних спрощуючих припущень, які мають бути обґрунтованими. Тому, обираючи з багатьох діючих на тіло сил лише декілька, ми зобов'язані визначити, за яких умов такий вибір є виправданим, так, щоб одержані результати задовільно узгоджувалися з експериментальними даними. Оскільки найбільш суттєву дію на тіло здійснюють Земля та навколишнє середовище, то силами, що діють на тіло, є:

- сила тяжіння \mathbf{F}_m , напрямлена вертикально вниз;
- аеродинамічна сила, що проявляє себе через свої складові — силу лобового опору \mathbf{F}_{on} , напрямлену проти вектора швидкості \mathbf{v} , та піднімальну силу \mathbf{F}_n , напрямлену перпендикулярно до вектора швидкості;
- архімедова (виштовхувальна) сила \mathbf{F}_A , що напрямлена вертикально вгору.

Якщо густина речовини тіла значно перевищує густину середовища, як це має місце у даному випадку, то дію архімедової сили в порівнянні з іншими силами можна знехтувати.

Усі три сили \mathbf{F}_m , \mathbf{F}_{on} та \mathbf{F}_n прикладені до центра мас, а прискорення, що його надає тілу рівнодійна всіх сил, визначимо за другим законом Ньютона:

$$a = \frac{F_m + F_{on} + F_n}{m}.$$

На рис. 1 зображене рухоме тіло і сили, що діють на нього, а також відповідні прискорення.

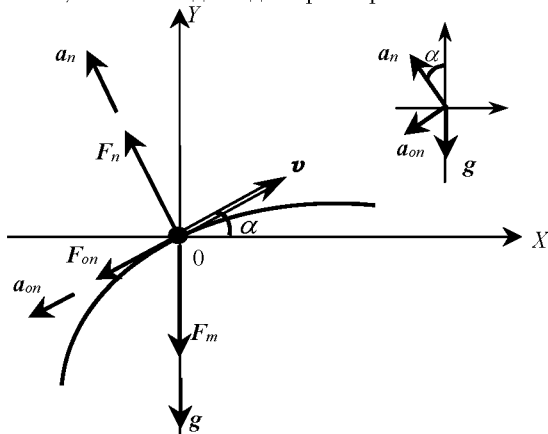


Рис. 1.

Для сили тяжіння \mathbf{F}_m маємо $\mathbf{F}_m = m\mathbf{g}$.

Обидві складові аеродинамічної сили згідно з теоремою Жуковського пропорційні квадратів швидкості:

$$F_{on} = kv^2, \quad F_n = bv^2,$$

де k і b — постійні коефіцієнти, що визначаються геометрією тіла (його формою та розмірами) і фізичними властивостями середовища.

У проекціях на вісі координат одержимо:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{F_{onx} + F_{nx}}{m} = \frac{-F_{on} \cos \alpha - F_n \sin \alpha}{m} = \\ &= a_x = -\frac{k}{m} v^2 \cos \alpha - \frac{b}{m} v^2 \sin \alpha. \\ a_y &= \frac{F_{my} + F_{ony} + F_{ny}}{m} = \frac{-mg - kv^2 \sin \alpha + bv^2 \cos \alpha}{m} = \\ &= a_y = -g - \frac{k}{m} v^2 \sin \alpha + \frac{b}{m} v^2 \cos \alpha. \end{aligned}$$

Вводячи позначення $R = k/m$ і $Q = b/m$, будемо мати:

$$a_x = -v^2(R \cos \alpha + Q \sin \alpha) \quad (1)$$

$$a_y = -g + v^2(Q \cos \alpha - R \sin \alpha) \quad (2)$$

Попереднє обговорення алгоритму роботи з моделлю

З виразів (1) і (2) видно, що величина прискорення не є постійною, а залежить від швидкості v та

кута α , які, у свою чергу, змінюються з плином часу. У межах шкільного курсу математики задачі з таким типом залежностей між змінними аналітично не розв'язуються. Тому скористаємось чисельним методом розв'язування, тобто виконаємо його шляхом покрокових обчислень.

1. Розіб'ємо весь час руху на достатньо малі проміжки Δt такі, щоб на протязі кожного проміжку зміна прискорення була настільки малою, аби ми могли вважати рух рівноприскореним.

2. Обчислимо швидкість \mathbf{v}_1 наприкінці першого проміжку Δt : $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_0 \Delta t$, де \mathbf{v}_0 , \mathbf{a}_0 — відповідно вектори швидкості та прискорення у початковий момент часу $t = 0$. У проекціях на вісі координат це дає:

$$v_{1x} = v_{0x} + a_{0x} \Delta t; \quad v_{1y} = v_{0y} + a_{0y} \Delta t.$$

При обчисленні швидкості наприкінці будь-якого інтервалу Δt ми і надалі будемо використовувати значення прискорення із попереднього інтервалу: $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{i-1} + \mathbf{a}_{i-1} \Delta t$, де \mathbf{v}_{i-1} — кінцева швидкість тіла на попередньому інтервалі Δt , яка одночасно є початковою швидкістю на даному інтервалі часу.

3. Модуль вектора швидкості v_1 визначимо за формулою:

$$v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2}.$$

4. Напрямок вектора \mathbf{v}_1 , тобто кут α_1 знайдемо за рис. 1:

$$\alpha_1 = \arccos \frac{v_{1x}}{v_1} \cdot \operatorname{sgn}(v_{1y}).$$

Для довільного моменту:

$$\alpha_i = \arccos \frac{v_{ix}}{v_i} \cdot \operatorname{sgn}(v_{iy}).$$

Зазначимо, що множник $\operatorname{sgn}(v_y)$ дає можливість одержувати від'ємні значення кутів для випадків, коли вертикальна складова швидкості v_y , напрямлена донизу, і додатні значення — для v_y , напрямленої вгору.

Якщо працювати лише з додатними значеннями кутів, наприклад, замість $\alpha = -90^\circ$ розглядати $\alpha = 270^\circ$, то рівняння доведеться дещо змінити:

$$\alpha = \begin{cases} \arccos \frac{v_x}{v} & \text{для } v_y \geq 0 \\ 360^\circ - \arccos \frac{v_x}{v} & \text{для } v_y < 0 \end{cases}$$

5. Нове положення тіла (нові координати) наприкінці першого проміжку Δt знайдемо за рівняннями:

$$x_1 = x_0 + v_{1cx} \Delta t; \quad y_1 = y_0 + v_{1cy} \Delta t.$$

При обчисленні координат наприкінці будь-якого інтервалу часу Δt будемо використовувати значення середньої швидкості із цього самого інтервалу:

$$x_i = x_{i-1} + v_{ix} \Delta t, \quad y_i = y_{i-1} + v_{iy} \Delta t,$$

де x_{i-1} , y_{i-1} — координати тіла наприкінці попереднього інтервалу Δt .

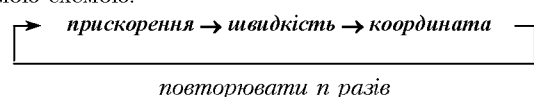
Затитання

1. Обчислити заздалегідь час польоту за відомих початкових умов (v_0 , a_0 , y_0) у межах шкільного курсу фізики можна в єдиному випадку — при дії на тіло однієї лише сили тяжіння. Чому?

2. Яка з кінематичних характеристик рухомого тіла дозволяє виявити, знаходиться тіло в польоті чи політ завершено?

Як завжди, значення проміжку Δt повинне задовольняти двом вимогам: 1) забезпечувати необхідну адекватність результатів розрахунків і 2) стійкість алгоритму роботи моделі (обчислювального алгоритму).

Послідовність розрахунків можна показати знайомою схемою:



Після всіх наведених міркувань запишемо

Остаточний алгоритм

1. Підготувати таблицю за зразком:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	t	v_x	v_y	v	α	a_x	a_y	x	y	Дано:	
2										$x_0 =$	
3										$y_0 =$	
4										$v_0 =$	
5										$\alpha_0 =$	
6										$\Delta t =$	
7										$g =$	
8										$R =$	
9										$Q =$	
...

2. Увести вхідні дані для моменту часу $t = 0$, тобто заповнити перший рядок таблиці і стовпець J (“Дано.”) іменами змінних, а стовпець K – їхніми числовими значеннями згідно умови задачі:

- x_0, y_0 – початкові координати;
- v_0 – початкова швидкість;
- α_0 – початковий кут нахилу вектора \mathbf{v}_0 до горизонту;
- $g = 9,81$ – прискорення сили тяжіння;
- R – фактор сили опору;
- Q – фактор піднімальної сили.

3. Заповнити другий рядок (для $t = 0$):

– $t = 0$;	– $\alpha = \alpha_0$;
– $v_x = v_0 \cos \alpha_0$;	– $a_x = -v^2(R \cos \alpha + Q \sin \alpha)$;
– $v_y = v_0 \sin \alpha_0$;	– $a_y = -g + v^2(Q \cos \alpha - R \sin \alpha)$;
– $v = v_0$;	– $x = x_0, y = y_0$.

Комірки таблиці матимуть такий уміст:

комірки	формули / числа
A2	0
B2	=D2*COS(E2*ПИ()/180)
C2	=D2*SIN(E2*ПИ()/180)
D2	=K\$4
E2	=K\$5
F2	=-D2^2*(K\$8*COS(E2*ПИ()/180)+K\$9*SIN(E2*ПИ()/180))
G2	=-K\$7+D2^2*(K\$9*COS(E2*ПИ()/180)-K\$8*SIN(E2*ПИ()/180))
H2	=K\$2
I2	=K\$3

Примітки:

а) при обчисленні прямих та обернених тригонометричних функцій (для комірок B2, C2, F2 та G2) електронні таблиці працюють з радіанною мірою кутів, проте для школярів більш звичним та наочним є використання градусної міри; у зв'язку з цим скористаємося формулою переходу від градусної міри до радіанної: $\varphi(\text{рад}) = \alpha^\circ \cdot \pi / 180$.

б) комірки B2 та C2 містять значення v_{0x}, v_{0y} – проєкцій вектора початкової швидкості \mathbf{v}_0 на вісі координат.

4. Заповнити третій рядок (для кінця першого проміжку Δt , тобто для моменту часу $t_i = t_{i-1} + \Delta t$, де $i = 1$):

– $v_{ix} = v_{(i-1)x} + a_{ix}\Delta t$;	– $a_{ix} = -v_i^2(R \cos \alpha_i + Q \sin \alpha_i)$;
– $v_{iy} = v_{(i-1)y} + a_{iy}\Delta t$;	– $a_{iy} = -g + v_i^2(Q \cos \alpha_i - R \sin \alpha_i)$;
– $v_i = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}$;	– $\alpha_i = \alpha_{i-1} + v_{ix}\Delta t$;
– $\alpha_i = \begin{cases} \arccos \frac{v_{ix}}{v_i} & \text{для } v_{iy} \geq 0 \\ 360^\circ + \arccos \frac{v_{ix}}{v_i} & \text{для } v_{iy} < 0 \end{cases}$	– $y_i = y_{i-1} + v_{iy}\Delta t$.

Відповідно у таблиці

комірки	формули / числа
A3	=A2+K\$6
B3	=B2+F2*K\$6
C3	=C2+G2*K\$6
D3	=(B3^2+C3^2)^0,5
E3	=ЕС.ЛИ(C3>=0;ACOS(B3/D3)*180/ПИ();360-ACOS(B3/D3)*180/ПИ())

F3	=-D3^2*(K\$8*COS(E3*ПИ()/180)+K\$9*SIN(E3*ПИ()/180))
G3	=-K\$7+D3^2*(K\$9*COS(E3*ПИ()/180)-K\$8*SIN(E3*ПИ()/180))
H3	=H2+B3*K\$6
I3	=I2+C3*K\$6

5. Копіювати третій рядок у n наступних рядків ($n = n_{\text{польоту}} / \Delta t$).

II. Рух тіла під дією сили тяжіння (тестування моделі)

Розглянемо приклади руху тіл під дією однієї лише сили тяжіння \mathbf{F}_m , знайомі нам із шкільного курсу механіки. Оскільки в цих випадках дією середовища на тіло звичайно нехтують, то й ми покладемо $Q = 0$ і $R = 0$, тобто виключимо з розгляду фактори аеродинамічної сили.

1. Спочатку дослідимо рух тіла, кинутого вертикально.

Нехай тіло починає рухатись над плоскою горизонтальною поверхнею з початковою швидкістю $v_0 = 10$ м/с з точки, що має координати $x_0 = 0, y_0 = 20$ м

- 1.1. вертикально вгору ($\alpha_0 = 90^\circ$);
- 1.2. вертикально вниз ($\alpha_0 = 270^\circ$);
- 1.3. без початкової швидкості ($v_0 = 0$).

Завдання. За пп. 1.1-1.3 виведіть на екран і розгляньте три таблиці.

У кожній з таблиць можна побачити, що час підйому та повний час польоту повністю відповідають розрахованим заздалегідь за формулами

$$v_y = v_{0y} - gt, \quad y = y_0 + v_{0y}t - gt^2/2.$$

Перша з цих формул дає час підйому при $v_y = 0$, а друга дає повний час польоту при $y = 0$ (до речі, наша модель цих формул не передбачає).

У випадках 1.2 і 1.3 кут $\alpha = -90^\circ$ автоматично перетворюється на $\alpha = 270^\circ$, а у випадку $v_0 = 0$, це має місце за будь-яких значень α_0 (!).

Той факт, що у всіх стовпцях, де розташовані проєкції змінних на вісь Ox , з'являються нулі, повністю узгоджується з умовою, що α_0 – прямий кут і, отже, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha_0 = 0$. Це зрозуміло з фізичних міркувань, але зараз ми маємо нагоду впевнитися в тому, що даний результат одержано на основі моделі.

2. Розглянемо рух тіла, кинутого під кутом до горизонту.

2.1. Почнемо з прикладу, коли тіло кидають горизонтально ($\alpha_0 = 0$). Початкові значення координат x_0, y_0 і швидкості v_0 залишимо попередніми.

Завдання

1 Доведіть, що нулі мають залишитись тільки у стовпці для значень a_x .

2 За таблицею встановіть, що будь-яким однаковим послідовним проміжкам часу відповідають однакові прирости Δx , а прирости для Δy послідовно зростають (спадують) на одну й ту саму величину.

Таку залежність Δy від Δx має тільки *квадратична функція*.

3 Беручи аргументами значення змінних із стовпця x , побудуйте траєкторію руху тіла – графік залежності $y = y(x)$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	t	v_x	v_y	v	a	a_x	a_y	x	y	Дано:	
2	0,0	10,00	0,00	10,00	0	0,00	-9,81	0,00	20,00	$x_0 = 0$	
3								1,00	19,90	$y_0 = 20$	
4								2,00	19,71	$v_0 = 10$	
5								3,00	19,41	$\alpha_0 = 0$	
6								4,00	19,02	$\Delta t = 0,1$	
7								5,00	18,53	$g = 9,81$	
8								6,00	17,94	$R = 0$	
9								7,00	17,25	$Q = 0$	
10								8,00	16,47		
...

Рис. 2.

Перевіримо модель на прикладі стандартної задачі.

Задача. Літак летить горизонтально на висоті 100 м із швидкістю 100 м/с. Від літака відокремлюється вантаж, який починає падати вниз. Нехтуючи опором повітря, знайти:

- скільки часу вантаж перебуватиме в польоті?
- на якій відстані від місця призначення (вздовж вісі Ox) треба звільнити вантаж, щоб він потрапив у це місце?
- з якою швидкістю вантаж торкнеться землі?

Змінимо згідно умови вміст комірок у попередній таблиці:

комірки	числа	коментарі
K3	100	початкова висота y_0
K4	100	початкова швидкість v_0

Порівнюючи відповіді, одержані розв'язанням за допомогою фізичних формул, з даними, одержаними за допомогою моделі (таблиці та графіка $y = y(x)$), можна переконатись, що вони добре узгоджуються.

2.2. Поширимо тестування на довільні кути.

Нехай, для визначеності, з точки, що має координати $x_0=0$, $y_0=0$ (початкові координати), з пружинного пістолета вистрілюють кульку під кутом $\alpha_0=60^\circ$ з початковою швидкістю $v_0=5$ м/с (рис. 3).

З отриманої таблиці маємо можливість побачити, що

...	N	I	J	K	
1	x	y	Дано:		
2	0,00	0,00	$x_0=0$		0,8
3	0,25	0,33	$y_0=0$		0,6
4	0,50	0,57	$v_0=5$		0,4
5	0,75	0,71	$\alpha_0=60$		0,2
6	1,00	0,75	$\Delta t=0,1$		0,0
7	1,25	0,69	$g=9,81$		-0,2
8	1,50	0,54	$R=0$		
9	1,75	0,28	$Q=0$		
10	2,00	-0,07			
...			

Рис. 3.

- часи підйому і падіння, а також повний час польоту співпадають з розрахованими теоретично;
- миттєві значення змінних a_y , v_y , v , y та α у межах усталеної точності є симетричними відносно моменту часу, що відповідає максимальній висоті підйому тіла.

Далі звернемося до задачі нестандартної.

Задача. Згідно з легендою відомий своєю влучністю Робін Гуд, маючи на меті передати листа в'язневі Ноттінгемського замку, загорнув у цей лист камінь і кинув його так, що камінь перелетів огорожу і точно потрапив у вікно в'язниці. Вважаючи, що камінь був кинутий з відстані d від огорожі висотою h і що вікно в'язниці знаходилося на відстані D від місця кидання (вздовж горизонталі) і було на висоті H , знайти, під яким кутом і з якою мінімальною початковою швидкістю був кинутий камінь? У момент кидання камінь знаходився на висоті L . Опором повітря знехтувати.

Виконаємо теоретичний розрахунок за такими даними:

$$x_0 = 0, y_0 = L = 2 \text{ м}; x_1 = d = 8 \text{ м}; y_1 = h = 6,8 \text{ м}; \\ x_2 = D = 13 \text{ м}; y_2 = H = 5,5 \text{ м}.$$

Спростимо розв'язування, поклавши $L = 0$.

Примітка. Оскільки зазначені три точки знаходяться на одній траєкторії (параболі), то, написавши двічі рівняння траєкторії для $x_1=d$, $y_1=h$ та для $x_2=D$, $y_2=H$, після перетворень можна одержати систему двох рівнянь з двома шуканими невідомими v_0 та α_0 .

Після математичного розв'язання задачі введемо до таблиці одержані відповіді як значення v_0 та α_0 і перевіримо результати за допомогою моделі. При цьому бажано зменшити інтервал Δt до 0,01, збільшивши відповідно кількість рядків таблиці копіюванням останнього рядка формул.

Дійсно, у виведеній на екран таблиці ми виявляємо дві пари координат, що відповідають заданим у умові точкам.

Короткі підсумки тестування

1. Можна було б стверджувати, що з пізнавальної точки зору розв'язки майже усіх попередніх задач особливої цінності не мають: всі вони відомі зі шкільного курсу фізики. Проте цінність має сама модель як узагальнення усіх можливих задач на рух під дією сили тяжіння.

2. Після численних перевірок прийшов момент, коли ми маємо прийняти і приймаємо рішення про відсутність у моделі помилок, а також рішення про те, що у межах зазначених вище припущень вона є адекватною розглянутим процесам.

3. Якщо раніше результати, які ми одержували за допомогою моделі, перевірялися розрахунками за "точними" формулами фізики, то відтепер ми надаємо собі право довіряти результатам, що їх буде давати наша модель. І при тому довіряти настільки, що саме за цими результатами будемо робити певні висновки про рухи, що їх ми моделюємо. Отже настав момент, коли модель із об'єкту, що підлягав перевірці, стає інструментом дослідження.

4. Проте не будемо перебільшувати ролі окремої моделі: адже модель — це усього лише наближений образ реального об'єкту (явища, процесу). І врахувати вона здатна лише ті властивості об'єкту, які є істотними саме на наш погляд.

III. Рух тіла під дією сили тяжіння та сили опору середовища

Тепер до складу суттєвих факторів включимо вплив середовища, у якому відбувається рух тіла. Звернемо тут увагу на принциповий факт: якщо у випадку дії однієї лише сили тяжіння можна було нехтувати формою та розмірами тіла і вважати його матеріальною точкою, то при спробі врахувати вплив середовища такий підхід виявляється суттєво хибним: адже середовище виявляє себе саме внаслідок наявності у тіла розмірів та форми.

Спеціально проведені дослідження показують, що модуль сили опору залежить від швидкості руху і при малих швидкостях він пропорційний швидкості, а при великих — пропорційний квадратові швидкості. Відповідь на питання, великою чи малою є деяка певна швидкість, значною мірою залежить від форми та розмірів тіла, а також від фізичних властивостей середовища. Тому може статися так, що одну й ту саму швидкість за одних умов необхідно буде вважати малою, а за інших — великою. Остаточну відповідь про вид залежності $F_{on} = F_{on}(v)$ може дати лише натурний експеримент.

Залежність сили опору від форми тіла характеризують спеціальним терміном — *обтічність*. Форму, при якій сила опору набуває меншого значення, називають більш обтічною. Саме такі форми намагаються надавати транспортним засобам, кулям та ракетам. У сучасній техніці обтічність тіл досліджують у спеціальних установках — аеродинамічних трубах, де рухається не саме тіло (або його фізична модель), а повітря. Обтічність водних засобів пересування досліджують у випробувальних каналах. Зразки обтічних форм у живій природі дають птахи, риби, дельфіни і т.п. істоти.

Затитання:

- 3 якою метою намагаються максимально покращити аеро- або гідродинамічні якості згаданих об'єктів?
- Наведіть приклади обтічних форм у різних видах спорту.
- З'ясуйте, якими проблемами переймається наука *біоніка*.

Напрямок сили опору завжди протилежний до напрямку вектора швидкості, а наведені вище міркування необхідні для того, щоб при створенні моделі прийняти певне припущення про характер залежності сили опору від швидкості. То ж приймемо цю залежність прямою пропорційною, тобто будемо досліджувати рух з невеликими швидкостями.

На основі прийнятого припущення запишемо $F_{on} = -kv$, де k — розмірний коефіцієнт пропорційності, який враховує геометричні характеристики тіла і фізичні властивості середовища.

Прискорення, що його надають тілу сили тяжіння й опору, будемо визначати за другим законом Ньютона.

Переходячи до проекцій і у відповідності з рис. 1, можна записати:

$$a_x = -\frac{k}{m} v \cos \alpha; \quad a_y = -g - \frac{k}{m} v \sin \alpha.$$

Як зазначалося при обговоренні алгоритму, обидві проекції прискорення a_x і a_y залежать від модуля швидкості v та кута α , а тому вектор прискорення є змінним у часі. В цій ситуації ми фактично позбавлені можливості здійснити кількісну перевірку нової моделі (за відсутності відповідних точних формул) і тому маємо задовольнитися лише перевіркою якісної: *будемо порівнювати з дослідними даними не числові значення, а поведінку досліджуваних величин.*

Обчислювальний експеримент

Зауважимо, що тимчасова зміна залежності сили опору від швидкості з квадратичної (за алгоритмом) на пряму пропорційну вимагає відповідної заміни формул для проекцій прискорення в стовпцях F і G:

комірки	формули
F2	$=-D2^{\wedge}1*(K\$8*\text{COS}(E2*\text{ПИ}()/180))+K\$9*\text{SIN}(E2*\text{ПИ}()/180))$
G2	$=-K\$7+D2^{\wedge}1*(K\$9*\text{COS}(E2*\text{ПИ}()/180)-K\$8*\text{SIN}(E2*\text{ПИ}()/180))$

Примітки:

- фрагмент “ $\wedge 1$ ” можна не вводити, він записаний тільки з метою показати зміни у формулах;
- уміст комірок F2 і G2 слід скопіювати у всі наступні рядки до самого низу таблиці.

У наступних експериментах знов будуть розглянуті чотири випадки рухів тіл під дією сили тяжіння, але з урахуванням опору середовища; вони відрізнятимуться тільки початковими умовами:

1. Рух без початкової швидкості.
2. Рух з початковою швидкістю, напрямленою вниз.
3. Рух з початковою швидкістю, напрямленою вгору.
4. Рух з початковою швидкістю, напрямленою під кутом до горизонту.

1. Дослідимо рух тіла, яке з деякої висоти зі стану спокою починає вертикально рухатись вниз за наявності сили опору повітря.

Введемо вхідні дані:

$$x_0 = 0, y_0 = 100 \text{ м}, v_0 = 0, \alpha_0 = 270^\circ, \\ g = 9,81 \text{ м/с}^2, \Delta t = 0,1 \text{ с}.$$

Приймемо $R = 0,6$ (це значення спеціально збільшене проти реального для зменшення кількості рядків таблиці).

Завдання. Встановіть розмірність коефіцієнта R .

Кількість рядків таблиці будемо обирати експериментально. При цьому критерій достатності визначатиметься змістом того конкретного питання, на яке ми шукатимемо відповідь.

Найбільший інтерес у розглядуваному русі являє питання про залежність швидкості від часу. Виведемо на екран таблицю з новими даними і новими формулами (рис. 4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	t	v_x	v_y	v	α	a_x	a_y	x	y	Дано:	
2	0,0	0,00	0,00	0,00	270	0,00	-9,81	0,00	100,00	$x_0 = 0$	
3	0,1	0,00	-0,98	0,98	270	0,00	-9,22	0,00	99,90	$y_0 = 100$	
4								0,00	99,71	$v_0 = 0$	
5								0,00	99,43	$\alpha_0 = 270$	
6								0,00	99,08	$\Delta t = 0,1$	
7								0,00	98,64	$g = 9,81$	
8								0,00	98,13	$R = 0,6$	
9								0,00	97,56	$Q = 0$	
10								0,00	96,92		
11								0,00	96,22		
...		

Рис. 4.

З таблиці бачимо, що проекції всіх векторів на вісь x , як і сама координата x , весь час дорівнюють нулю (стовпці B, F, H). Було б дивно, якби ми отримали щось інше.

Та головне полягає в тому, що модуль швидкості v руху весь час монотонно зростає, але спостерігаючи зміну швидкості за послдовні однакові проміжки часу, виявляємо, що темп цього зростання монотонно уповільнюється і швидкість з часом перестає змінюватись. Отже *рух за наявності опору середовища не є рівноприскореним*, як цього і слід було чекати. Одночасно із стовпця G для значень a_y видно, що модуль цієї складової прискорення поступово зменшується, наближаючись до нуля. Це означає, що рух, врешті, перетворюється на рівномірний.

Кількість рядків таблиці має бути такою, щоб можна було бачити перехід y -координати через нуль (момент закінчення падіння).

Повчальним та інформативним щодо аналізу процесу є порівняння графіків залежності v_y та a_y від часу (рис. 5).

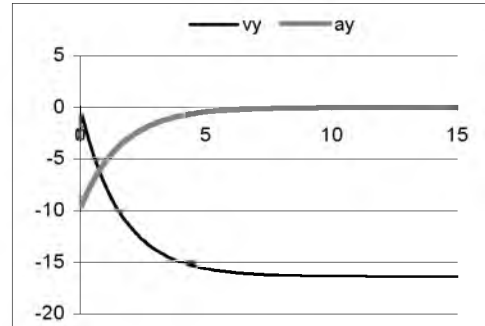


Рис. 5.

Завдання. Прокоментуйте рис. 5.

До речі, саме у такий спосіб рухаються у повітрі парашутисти за відсутності вітру.

Наша модель може статися у нагоді для перевірки результату розв'язування цікавої фізичної задачі.

Задача. Чому при падінні двох однакових за розмірами, але різних за масами кульок більшу кінцеву швидкість має кулька більшої маси?

Розв'язування. При падінні на кожну кульку діють дві протилежно направлені сили: постійна сила тяжіння $F_m = mg$ і змінна сила опору повітря $F_{on} = -kv$.

На початку руху $F_{on} = 0$ (оскільки $v_0 = 0$), а у міру зростання швидкості сила F_{on} також зростає. Модуль рівнодійної цих сил $Z = F_m - F_{on}$, а отже і результуюче прискорення a_y , поступово зменшуються. Нарешті, у той момент, коли сила опору стає рівною силі тяжіння, прискорення кульки a_y стає рівним нулю і рух перетворюється на рівномірний.

Починаючи з цього моменту, весь наступний час польоту $F_{on} = F_m$, тобто $kv_{max} = mg$. Тут v_{max} — швидкість усталеного рівномірного руху. Звідси

$$v_{max} = m \frac{g}{k}.$$

Тепер видно, що внаслідок опору швидкість усталеного руху падаючих у повітрі тіл дійсно більша для тіла більшої маси, оскільки за умовою форма й розміри тіл однакові, а отже однаковими мають бути і значення k .

Оскільки остання формула не містить початкової швидкості v_0 та початкової висоти y_0 (у всякому разі в явному вигляді v_0 й y_0 до формули не входять), виникає припущення (гіпотеза): *значення усталеної швидкості не залежить від початкових умов руху.*

З метою перевірки цієї гіпотези розглянемо:

2. Рух тіла, кинутого вертикально вниз.

2.1. Перед стовпцем Е зі значеннями модуля швидкості v вставимо новий стовпець, який дістане ім'я Е, при цьому колишній Е стане F і т.д. аж до кінця таблиці.

2.2. У стовпець К ("Дано:") введемо нові початкові умови: $y_0 = 250$ м, $v_0 = 10$ м/с, $\alpha_0 = 270^\circ$. Інтервал Δt зменшимо удвічі, взявши $\Delta t = 0,05$ с.

Усі комірки стовпця D скопіюємо без формул у новий (Е) в режимі "Правка" → "Спеціальна вставка" → "Значення". Після копіювання попередні дані стовпця К міняємо на нові: $y_0 = 350$, $v_0 = 0$. У стовпці D з'являться нові значення модуля швидкості v .

Таким чином, ми маємо можливість одночасно працювати з двома стовпцями — активним D (з формулами) і пасивним Е (без формул). Зрозуміло, і в цьому легко впевнитись експериментально, що на будь-які зміни у стовпці "Дано:" реагувати тепер будуть тільки значення стовпця D.

Нагадаємо, що закінчення руху відбувається при переході y -координати через нуль. Коли при порівнянні швидкостей ми не виявимо виходу на режим усталення, то причина цього може полягати або в тому, що тіло ще не завершило політ, або в тому, що недостатньою була початкова висота y_0 .

Порівнюючи значення швидкостей у сусідніх стовпцях D і Е, а також відповідні графіки, бачимо, що значення усталених швидкостей майже однакові, хоч усталення цих величин відбувається у різні моменти часу. Тому можна відмітити, що наша гіпотеза майже підтверджується (рис. 6). Щоб позбавитись цього "майже", при формулюванні гіпотези слід було вказати, що початкова висота має бути достатньою для того, щоб процес перейшов на усталений режим. У даній таблиці, зокрема, для забезпечення точності у два десяткових розряди при зазначених вище даних довелося створити майже 160 рядків.

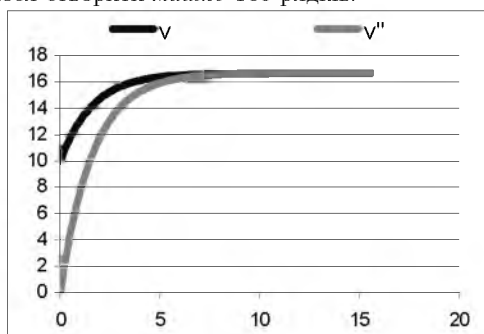


Рис. 6.

Запитання:

1. Якби опір середовища був відсутній, то чи спостерігали б ми результат, про який щойно було сказано: "...значення усталених швидкостей майже однакові, хоч усталення... відбувається у різні моменти часу"?

2. Як впливає значення початкової швидкості на час виходу миттєвої швидкості на усталений режим? Обґрунтуйте свої міркування даними обчислювального експерименту.

Далі слід видалити спочатку графік, а потім — вставлений стовпець.

3. Тепер розглянемо рух тіла, кинутого вертикально вгору за такими початковими даними:

$$x_0 = 0, y_0 = 0, v_0 = 10 \text{ м/с}, \alpha_0 = 90^\circ, \Delta t = 0,025 \text{ с}, \\ g = 10 \text{ м/с}^2, R = 0,6 \text{ кг/с}.$$

Отримаємо таблицю, за якою порівняємо часи підйому і падіння.

Умова $y \geq 0$ перестав виконуватись на 69 рядку, якому відповідає повний час польоту $t_{\text{пльоту}} = 1,675$ с.

Час підйому відповідає максимальному значенню y -координати. За таблицею $y_{\text{max}} = 3,392$ м, а $t_{\text{підйому}} = 0,650$ с.

Оскільки час падіння $t_{\text{падіння}} = t_{\text{пльоту}} - t_{\text{підйому}}$ то $t_{\text{падіння}} = 1,675 \text{ с} - 0,650 \text{ с} = 1,025 \text{ с}$.

Отже за наявності сили опору середовища час падіння завжди більший за час підйому.

Завдання.

1. Обґрунтування цього факту становить окреме питання, яке ми й пропонуємо вам вирішити, тобто дати йому фізичне тлумачення.

2. Переглядаючи таблицю, можна бачити, що швидкість тіла у момент падіння менша за початкову швидкість v_0 у повній відповідності із законом збереження і перетворення енергії. Про яке збереження і перетворення енергії йдеться?

4. Рух тіла, кинутого під довільним кутом до горизонту.

Змінимо у попередньому прикладі початкове значення кута α_0 , залишаючи решту вхідних даних незмінними. Нехай $\alpha_0 = 60^\circ$.

Якщо закінченням руху знов будемо вважати момент переходу y -координати через нуль, то орієнтовна кількість рядків таблиці становитиме 30. Нарешті у стовпцях B, F та I таблиці з'являються ненульові значення.

4.1. Шукатимемо спочатку відповідь на питання про вигляд траєкторії. З цієї метою розглянемо стовпці H та I, де приміщені значення координат x та y . З таблиці видно, що x -координата найвищої точки траєкторії більша за $x_{\text{max}}/2$. Це означає, що тепер траєкторія руху (рис. 7) не є параболою: підйом відбувається вздовж пологої ділянки, а зниження — вздовж крутішої.

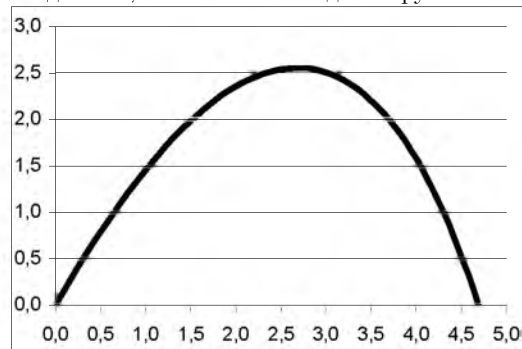


Рис. 7.

За такою траєкторією рухається після удару вола у бадмінтоні. Знавці цієї гри часто виконують високі подачі, після яких вола знижується на полі суперника майже вертикально, що позбавляє можливості нанести сильний удар у відповідь. Експерименти на моделі з різними початковими кутами кидання добре узгоджуються із цим фактом.

Зовні схожими, але в дійсності значно складнішими, є траєкторії рухів футбольного м'яча або тенісної кульки під час гри. Справа в тому, що часто при ударі їх підкручують, а це викликає додаткові ускладнення в русі цих тіл (зокрема, так званий *ефект Магнуса*). Якщо ж їхній рух буде поступальним, то всі зазначені вище особливості матимуть місце.

4.2. Поклавши $v_0 = 100$ м/с, можна одержати безперечно цікаву інформацію, що її дають виведені разом на екран графіки залежності v_x , v_y та v від часу: із плином часу всі компоненти швидкості руху переста-

ють змінюватись (рис. 8). Орієнтовна кількість рядків таблиці у цьому випадку становить 200.

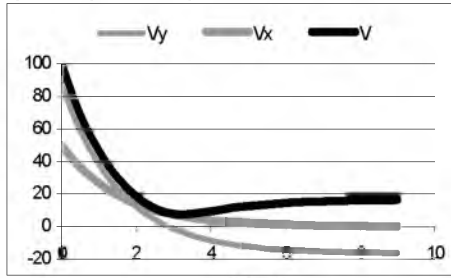


Рис. 8.

Завдання. Дайте фізичне тлумачення зображеним залежностям.

На закінчення цього розділу знов зробимо

Висновки

У цьому розділі була здійснена спроба включення до розгляду сили опору середовища, пропорційної швидкості. У межах прийнятого припущення було встановлено, що

1) за достатньої тривалості часу, протягом якого відбувається рух, має місце усталення (стабілізація) значення швидкості і, як довела перевірка;

2) за достатньої початкової висоти цей факт не залежить від початкових умов;

3) час підйому і час падіння до початкового рівня не однакові: $t_{\text{підйому}} < t_{\text{падіння}}$;

4) траєкторія руху не є параболою, її висхідна частина більш пологіста, ніж спадна.

На якісному рівні одержані результати добре узгоджуються з відомими фактами.

Тут на деякий час доцільно відкласти читання і вимкнути комп'ютер. З аркушу паперу складіть літачок і поспостерігайте за тими викрутасами, які він виконує у повітрі, якщо його запускати з різними швидкостями і під різними кутами. Це, по-перше, дасть можливість трохи відпочити, а по-друге, після таких експериментів стане набагато цікавіше працювати з новою версією моделі.

IV. Рух тіла під дією трьох сил: сили тяжіння, сили опору середовища та піднімальної сили

Щойно проведені експерименти переконливо доводять, що паперовий літачок поводить себе у польоті набагато цікавіше, аніж камінь або волан від бадмінтону. Навіть, якщо кидати його строго горизонтально, то в залежності від початкової швидкості він або майже вертикально падає на підлогу, або ж прямує під саму стелю. Вгадати заздалегідь траєкторію його польоту практично неможливо, однак це зовсім не означає, що поведінка нашого літачка, який виписує у повітрі складні фігури, не піддається ніякому аналізу.

Оскільки найбільш цікавими у проведених дослідках виявилися саме траєкторії руху, головною метою подальшого дослідження вважатимемо побудову траєкторій. При цьому, як вище вже зазначалося, тими спрощеними підходами, які ми застосовуємо до аналізу складних фізичних явищ, найбільшим, чого ми зможемо досягти, має бути *лише якісний результат*. Це означає, що очікуваним підсумком дослідження буде тільки загальна картина перебігу процесу. Проте, як стане видно з наступного, і цього не буде замало.

Отже, переважну дію на літачок спричиняють Земля і середовище, а відповідними силами є сила тяжіння F_m та аеродинамічна сила, яка проявляє себе через свої складові — силу лобового опору F_{on} та піднімальну силу F_n .

Розглянемо тепер повну версію моделі. З цієї метою врахуємо вплив на тіло піднімальної сили, тобто перейдемо до умови $Q \neq 0$. Значення Q добиратимемо експериментально.

Здавалося б, можна переходити до обчислювального експерименту, та варто ще раз оцінити ситуацію,

у якій ми опинилися. Отже, ми будемо модель, що має враховувати вплив на тіло трьох сил, кожна з яких спричиняє певного прискорення. Два з них — прискорення сили лобового опору та прискорення піднімальної сили визначаються через коефіцієнти R та Q , значення яких нам невідомі. І хоч вони при роботі з моделлю можуть добиратися експериментально (шляхом поступового збільшення від нуля), проте, як виявляється, це не так просто. Якщо до того ж додати, що так само без відповіді поки що залишається питання про значення інтервалу часу Δt , який впливає на точність обчислень та на стійкість алгоритму, то можна у повній або, принаймні, у певній мірі відчувати типовий стан, у якому часто опиняється дослідник, котрий займається моделюванням.

Знаходження значень невідомих коефіцієнтів моделі становить самостійну, так звану обернену задачу моделювання.

Для з'ясування питання про можливі значення невідомих коефіцієнтів при нагоді намагаються виконати досить надійні натурні експерименти, які дають змогу визначити ці величини. Такої можливості ми позбавлені.

Так само ми не маємо можливості скористатися іншим відомим у моделюванні способом — скористатися теоретичними співвідношеннями, за допомогою яких ці величини можна було б обчислити.

Які ж дії нам слід здійснити в означеній ситуації? Адже до тих пір, поки нами не буде прийняте рішення про значення невідомих R , Q та Δt , ми не зможемо зрушити з місця. Залишається останнє: вдатися до спрощеної оцінки невідомих параметрів. У певній мірі це краще, ніж блукати навмання.

Можливо, має рацію пропозиція скористатися відповідними значеннями невідомих з попередньої моделі? Та більш-менш детальний аналіз доводить, що робити цього не варто. Адже значення R свого часу було обрано за умови лінійної залежності сили опору від швидкості, нині ж ця залежність є квадратичною. Це означає, що тепер за тих самих значень швидкості сила опору зростатиме помітно швидше. Тому нове значення R має бути меншим, приміром, $R=0,2-0,3$. Що ж стосується значення Q , то, враховуючи, що залежність піднімальної сили від швидкості також є квадратичною, спробуємо прийняти його більшим за R , наприклад, $Q=0,5-0,7$: у такий спосіб ми сподіваємося більш рельєфно проявити вплив піднімальної сили на рух тіла.

Оскільки траєкторії, що їх виписував ваш паперовий літачок, інколи виявлялися досить складними, то прийняттю вбачається пропозиція про необхідність брати достатньо малі значення Δt для побудови більш-менш точної траєкторії (хотілося б не загубити навіть дрібні деталі). Крім того, зменшення інтервалів Δt сприяє покращенню адекватності моделі. Пам'ятаючи, однак, якою ціною даються такі вдосконалення (насамперед, додаткові витрати пам'яті та збільшення часу обчислень), ми повинні шукати компромісу між нашими бажаннями і платнею за них. То ж з метою задоволення зазначених вимог замість $\Delta t = 0,1$ с приймемо $\Delta t = 0,05$ с.

Ще раз зауважимо, що добір заздалегідь невідомих значень величин R , Q та Δt був здійснений на основі наших інтуїтивних уявлень про вище. Звідси випливає, що надійної гарантії успіху дати тут не можна, тобто не можна цілком покладатися на них. Ці значення є лише орієнтовними і для їхнього уточнення необхідно виконати декілька попередніх обчислювальних експериментів з моделлю.

Обчислювальний експеримент

Після декількох спроб можна одержати, наприклад, такі прийнятні вхідні дані:

$$x_0 = 0, y_0 = 4 \text{ м}, v_0 = 6 \text{ м/с}, \alpha_0 = 30^\circ, \\ R = 0,2 \text{ м}^{-1}, Q = 0,6 \text{ м}^{-1}, \Delta t = 0,05 \text{ с}.$$

Відповідно до цих даних будується траєкторія (рис. 9).

Поступово збільшуючи початкову швидкість v_0 , наприклад, на 1 м/с, ми з часом одержимо таке її значення, при якому характерною прикметою графіка стане “надлом” у найвищій точці (рис. 10).

Цікаво, як відреагує модель на подальше збільшення швидкості? Невже наша украй спрощена модель дійсно здатна на щось більш складне? Ситуація дійсно інтригуюча! Тут нам нічого не залишається, як продовжити збільшення початкової швидкості. І ось вона — нагорода за наполегливу працю і терпіння: наш літакчик описав саму справжню “мертву петлю”! Ця дивовижна картинка здатна будь-кого привести у захват (рис. 11).

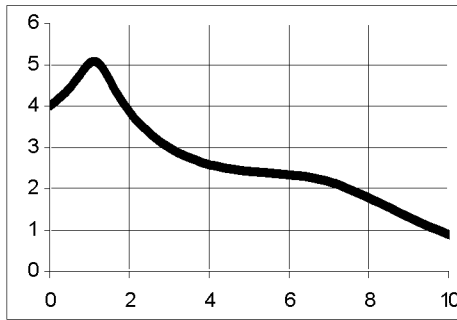


Рис. 9.

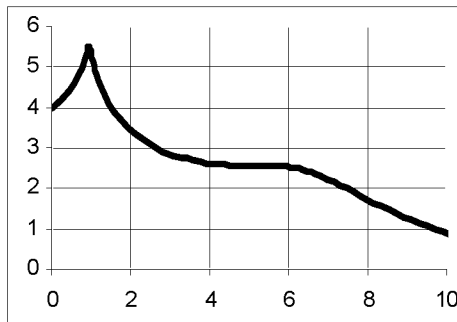


Рис. 10.

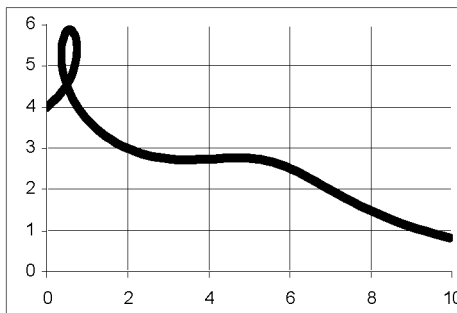


Рис. 11.

Заспокоймо, однак, емоції і поставимо питання: а чи можна сказати, буде чи не буде виконана петля, якщо не будувати графік, а тільки аналізувати таблицю? Виявляється, так. Необхідна інформація міститься у стовпці для значень кута α , що його утворює вектор швидкості v з додатним напрямом вісі Ox .

Адже у криволінійному русі вектор швидкості завжди напрямлений вздовж дотичної до траєкторії у кожній її точці (у кожний момент часу). Саме тому надійною ознакою петлеподібного руху є монотонне зростання кута α з переходом через 360° (або через 0°).

Такий спосіб не єдиний, але найзручніший. Для порівняння розглянемо ще один, згідно з яким тієї ж мети буде досягнуто, якщо, наприклад, спочатку з'ясувати для себе, яким чином з плином часу мають змінюватися координати x , y рухомого тіла, якщо воно описує петлеподібну траєкторію, а потім спробувати за таблицею виявити подібний фрагмент.

4. Досвід попередньої роботи станеться вам у нагоді, якщо ви перейдете до дослідження моделі при помітно більших (порядку 20 м/с і більше) початкових швидкостях. Виконуючи такі експерименти, ви неодмінно потрапите в ситуацію, коли порушиться стійкість алгоритму і необхідним стане прийняття рішення про зміну (зменшення) значених вище параметрів задля “рятування” моделі.

Вправа.

1. Виконайте завдання, запропоновані у пп. 3 і 4, користуючись останньою таблицею.

2. Що утримує літакчик у той момент, коли вектор швидкості утворює кут $\alpha = 90^\circ$ і $\alpha = 270^\circ$ з горизонтом, тобто коли він напрямлений вертикально? Поясніть з точки зору фізики.

Висновки

1. Задачу, поставлену нами на початку глави, на якісному рівні розв'язано. Користуючись порівняно простими ідеями, ми одержали різноманітні траєкторії рухів паперового літакчика у повітряному середовищі, незважаючи на те, що точне аналітичне розв'язання задачі про планер (розв'язання складної системи диференціальних рівнянь) засобами шкільної математики абсолютно неможливе.

2. Побудована нами модель на якісному рівні непогано відтворює реальні рухи у межах прийнятих припущень. Основна таблиця моделі за кількістю виведених змінних виявилася досить інформативною, але при бажанні ви можете додати стовпці для спостереження за поведінкою миттєвих значень модуля прискорення та рівнодійної всіх сил, що діють на тіло.

3. Та все одно видається випадковим везінням, що порівняно проста модель здатна давати такі реалістичні результати, нехай і на якісному рівні. Тим більше, що про конкретну форму рухомого тіла в ній взагалі не говориться нічого. Невже і насправді так легко примусити тіло невизначеної форми описати “мертву петлю”? Справа в тому, що використані нами формули Жуковського *вже передбачають* наявність аеродинамічних характеристик (форми та розмірів) рухомого тіла — планера. Дійсною проблемою є саме створення реального об'єкту із заданими характеристиками.

Список використаних джерел:

1. Теплицький І.О. Факультативний курс “Основи комп'ютерного моделювання” // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного педагогічного університету: Серія педагогічна. Випуск 8: Дидактики дисциплін фізико-математичної та технологічної освітніх галузей. — Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський державний педагогічний університет, інформаційно-видавничий відділ, 2002. — С.210-217.
2. Теплицький І.О., Семеріков С.О. Методика ознайомлення школярів з поняттям фазового простору в курсі фізики // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного університету: Серія педагогічна. Випуск 9: Методологічні принципи формування фізичних знань учнів і професійних якостей майбутніх учителів фізики та астрономії. — Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський державний університет, інформаційно-видавничий відділ, 2003. — С.163-165.
3. Теплицький І.О., Семеріков С.О. Комп'ютерне моделювання руху тіл під дією сили всесвітнього тяжіння // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного університету: Серія педагогічна. Випуск 10: Дидактики дисциплін фізико-математичної та технологічної освітніх галузей. — Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський державний університет, інформаційно-видавничий відділ, 2004. — С.166-172.
4. Теплицький І.О., Семеріков С.О. Необмежені можливості та можливі обмеження застосувань комп'ютера у фізичному лабораторному експерименті // Фізика та астрономія в школі. — 2004. — №2. — С.47-49.

The article is devoted to methodic teaching of computer modeling in course "Elements of computer modeling in physics" for pupils of 9-11 forms with profound studying of technical, physical and mathematical disciplines.

Key words: computer simulation, spreadsheets.

Отримано: 4.05.2005.

УДК 371:53

А.В.Ткаченко, Л.О.Кулик, О.І.Богатирьов

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ВИКОРИСТАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗАДАЧ З ФІЗИКИ ПРИ ВИКОНАННІ ФРОНТАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Показана доцільність використання експериментальних задач при виконанні учнями фронтальних лабораторних робіт.

Ключові слова: експериментальна задача, фронтальна лабораторна робота, творча діяльність, навчальні досягнення.

При підготовці та проведенні фронтальних лабораторних робіт вчитель, окрім проблем з матеріальною базою, підтриманням на такому уроці належної дисципліни, забезпеченням самостійності роботи учнів, зустрічається ще з одним утрудненням — об'єктивним диференційованим оцінюванням виконаних учнями робіт. Кому з учнів виставити найвищий бал, хто з них проявив творчу, а не репродуктивну діяльність? Зазвичай вчитель серед інших виділяє більш охайні роботи, оцінює вірність розрахунків, кількість помилок і помилок, коректність відповідей учнів при захисті ними виконаних робіт. Навряд чи таку учнівську діяльність можна назвати творчою (вміння виявляти проблеми, формулювати гіпотези, розв'язувати проблеми). Звідси напрашується висновок: навчальні досягнення учнів при виконанні фронтальних лабораторних робіт у їх традиційній постановці не можуть бути оцінені четвертим (високим) рівнем, тобто їм не можна виставити а ні 10, а ні 11, а ні 12 балів [4].

Ефективність фронтальних лабораторних робіт, на нашу думку, можна підвищити, якщо до кожної з них підібрати ряд експериментальних задач, у тому числі і таких, які можна виконати вдома. Так, наприклад, при підготовці до фронтальної лабораторної роботи "Визначення показника заломлення скла" учням заздалегідь можна запропонувати одну або декілька задач, описаних нами в [5]. Тієї ж дидактичної мети можна досягти, якщо запропонувати класу піміркувати, як, маючи певне обладнання, визначити показник заломлення води. У цьому випадку радимо вчителю скористатися такими експериментальними задачами:

Задача 1. Визначити показник заломлення води.

Обладнання: вода, звичайний або хімічний стакан, лінійка, три шпильки, картон, ширина якого дорівнює внутрішньому діаметру стакана, а довжина на 4-5 сантиметрів більша його висоти.

Задача 2. Оцінити показник заломлення води.

Обладнання: прямокутний акваріум, прицільна трубка (частина кулькової ручки, де розміщується стержень), дві лінійки, штатив, вода.

Задача 3. Визначити показник заломлення води за допомогою мікроскопа.

Обладнання: мікроскоп з індикатором висоти піднімання тубуса, вода, мензурка з поділками, лінійка, чашка Петрі.

Це найпростіші з задач такого плану, вони не потребують електричного обладнання, першу з них можна виконати в домашніх умовах, вона майже повністю повторює лабораторну роботу №3 із шкільного підручника [1]. В ній використовуються найпростіші прилади — ті ж шпильки, за допомогою яких в оптиці виконано стільки блискучих експериментів і до яких сучасні вчителі фізики чомусь ставляться із зневагою.

До фронтальної лабораторної роботи "Визначення головної фокусної відстані і оптичної сили збиральної лінзи" можна запропонувати наступні експериментальні задачі.

Задача 4. Визначити оптичну силу лінзи.

Обладнання: лінза, лінійка, лист паперу, олівець.

Задача 5. Визначити фокусну відстань збиральної лінзи не користуючись штучним джерелом світла.

Обладнання: лист паперу, чотири кнопки, збиральна лінза, лінійка, голка.

І ці задачі не є складними, вони також можуть слугувати домашнім завданням. Проте розв'язування таких задач сприяє "оволодінню учнями досвідом творчої діяльності — від використання простого алгоритму та вже відомих методів пошуку розв'язань до розв'язань на інтуїтивному рівні із включенням механізмів творчої уяви" [2]. Процес розв'язування експериментальної задачі вимагає від учня створення моделі-гіпотези, на основі якої йому потрібно спланувати експеримент, виміряти саме ті величини, які потрібні для визначення шуканої [5]. Безперечно, розв'язок таких задач носить суб'єктивну новизну, що з точки зору психології є суттєвою ознакою творчості. Ще у 1899 році відомий психолог Теодоль Рібо писав: "Будь-яка нормальна людина займається творчістю у більшій чи меншій мірі, за своїм неутвором вона може винайти те, що вже винайшли тисячі разів. Якщо для інших воно не буде створенням чогось нового, то для самого винахідника воно буде ним" [6].

Ми свідомі того, що не всі учні з ентузіазмом сприймуть додаткові завдання, не всі виявлять бажання віднайти і познайомитись з необхідною літературою, в тому числі і через Internet, одиниці із задоволенням поставлять у школі чи вдома експеримент. Але і мета вчителя у даному випадку полягає не в тому, щоб навчити всіх в однаковій мірі. Вчителю необхідно оцінити найвищим балом саме тих, хто проявив творчість, зацікавленість, розвинути талант учня, підготувати його до можливої олімпіади, адже експериментальні задачі є невід'ємною складовою фізичної олімпіади будь-якого рівня. Цієї мети таке доповнення фронтальних лабораторних робіт експериментальними задачами, на наше переконання, досягає.

Пропонується наступна організація навчального процесу при проведенні фронтальних лабораторних робіт. На початку навчального року (півріччя) вчитель роздає учням надрукований перелік фронтальних робіт з підбраної до кожної з них експериментальними задачами. Деякі з таких задач можна взяти, наприклад, з [3]. При цьому вчителю слід враховувати наявну матеріальну базу та можливість використання найпростіших саморобних приладів та пристроїв. На початковому етапі доцільно вказати і допоміжні літературні